



基于采动覆岩裂缝劣化瞬态模型水砂起动运移机制研究

张贵彬 王荣强 丁银磊 张文泉 吕柄翰

引用本文:

张贵彬, 王荣强, 丁银磊, 等. 基于采动覆岩裂缝劣化瞬态模型水砂起动运移机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 324–336.

ZHANG Guibin, WANG Rongqiang, DING Yinlei. Research on the critical instability mechanism of water and sand inrush based on the steady-state mining-induced fracture degradation model[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 324–336.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0564>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究

Study on solid–fluid coupling similarity simulation test of water–sand inrush during mining of shallow buried thin bedrock roof
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 165–175 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1227>

基于LBM–DEM耦合方法的突水溃砂运移规律研究

Study on laws of water inrush and sand burst migration based on LBM–DEM coupling method
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 206–216 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.024>

薄基岩顶板工作面突水溃砂及切顶灾害试验研究

Experimental study on disaster of water–sand inrush and roof cutting in working face with thin bedrock roof
煤炭科学技术. 2021, 49(11): 125–133 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3eafd602-e303-4895-bdb6-f54b99dfef02>

煤矿开采水浸弱化流固耦合模拟方法与工程应用

Simulation method and engineering application of fluid solid coupling for water immersion weakening in coal mining
煤炭科学技术. 2025, 53(6): 407–417 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0383>

采动诱发的含原生裂隙覆岩运移及涌(淋)水时空特征分析

Study on overlying strata containing primary fractures migration and spatial–temporal characteristics of water gushing (leaching) caused by mining field disturbance
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0323>

弱胶结地层条件下工作面溃水溃砂规律模拟研究

Numerical simulation study on law of water and sand inrush in working face under condition of weakly cemented stratum
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/52cf7265-a4f2-46eb-a131-e6e28585b2f6>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张贵彬,王荣强,丁银磊,等.基于采动覆岩裂缝劣化瞬态模型水砂起动运移机制研究[J].煤炭科学技术,2025,53(8):324-336.

ZHANG Guibin, WANG Rongqiang, DING Yinlei, *et al.* Research on the critical instability mechanism of water and sand inrush based on the steady-state mining-induced fracture degradation model[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 324-336.

基于采动覆岩裂缝劣化瞬态模型水砂起动运移机制研究

张贵彬¹,王荣强¹,丁银磊²,张文泉³,吕柄翰¹

(1. 临沂大学 土木工程与建筑学院, 山东 临沂 276000; 2. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 邹城 273500; 3. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:松散层下薄基岩采动裂缝通道劣化诱发突水溃砂灾害,严重威胁矿井安全生产。为探究采动覆岩裂缝通道时空演化特征及其内部水砂两相起动-运移机制,基于松散层下薄基岩采动数值模拟,构建4类采动裂缝劣化瞬态模型,通过采动裂缝不同瞬时形态(裂缝开度、裂缝形态)、砂粒粒径及水压条件下溃砂量、溃砂质量流量、砂粒结拱时间、矢跨比、拱脚线角和砂粒接触应力分布的时变特征分析,获取采动劣化缝内水砂运移流溃与砂粒结拱淤滞特征,进而揭示采动覆岩破坏水砂两相运移-淤滞交替时空灾变机理。结果表明:在采动覆岩裂缝演化过程中水砂运移呈现砂粒结拱淤滞与粒拱失稳流溃交替特征,裂缝开度与砂粒粒径的相对关系是决定砂粒结拱抑或失稳流溃的关键。砂粒粒径、水压对砂粒结拱与粒拱失稳流溃均起到“双向促进”作用;即当裂缝内砂粒结拱淤滞时,砂粒粒径、水压增加会提高砂粒结拱几率与粒拱稳定性,进而降低致灾风险,砂粒粒径、水压分别与拱粒数目、结拱时间均呈负相关性,与粒拱稳定性呈正相关性;当裂缝劣化引发粒拱结构失稳流溃时,砂粒粒径、水压与溃砂质量流量均呈线性正相关,砂粒粒径、水压的增大会反向加剧致灾危害程度。

关键词: 突水溃砂;裂缝劣化;瞬态模型;流固耦合;灾变机理

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)08-0324-13

Research on the critical instability mechanism of water and sand inrush based on the steady-state mining-induced fracture degradation model

ZHANG Guibin¹, WANG Rongqiang¹, DING Yinlei², ZHANG Wenquan³, LYU Binghan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Linyi University, Linyi 276000, China; 2. Yan Kuang Energy Group Company Limited, Zoucheng 273500, China; 3. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The deterioration of the thin bedrock mining crack channel under the loose layer induces sudden water and sand inrush disasters, which seriously threatens the safe production of the mine. To investigate the spatiotemporal evolution characteristics of mining-induced fracture channels in overlying strata and the two-phase (water-sand) initiation-transport mechanisms within them, four types of transient models for fracture degradation were constructed based on numerical simulations of mining-induced thin bedrock beneath unconsolidated layers. By analyzing parameters including instantaneous fracture morphology (aperture and geometry), sand particle size, and hydraulic pressure conditions, key indicators such as sand inrush volume, mass flow rate, sand arch formation time, rise-span ratio, arch foot line angle, and contact stress distribution were systematically evaluated. This approach enabled the characterization of water-sand migration dynamics and arch-induced stagnation patterns within mining fractures, thereby revealing the alternating spatiotemporal catastrophe mechanism of water-sand transport-stagnation cycles during overburden fracture propagation. The spatiotemporal evolution of water-sand migration in mining-induced fractures of overlying strata is characterized by alternating phases of sand arch formation/stagnation and arch in-

收稿日期: 2025-04-24

策划编辑: 常琛

责任编辑: 陈思成

DOI: 10.12438/cst.2025-0564

基金项目: 山东省自然科学基金青年资助项目(ZR2021QD091); 山东省高等学校“青创团队计划”团队资助项目(2022KJ112)

作者简介: 张贵彬(1988—),男,山东临沂人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail: zgy_1989@126.com

通讯作者: 王荣强(2001—),男,山东枣庄人,硕士研究生。E-mail: Wrq19560853191@163.com

stability/flow inrush. The relative relationship between fracture aperture and sand particle size (termed “aperture-particle ratio”) is identified as the critical determinant of sand arch formation or instability. Both sand particle size and hydraulic pressure are found to exert dual-directional promotion effects on these processes. During the arch formation/stagnation phase, increased particle size and hydraulic pressure enhance arch formation probability and stability, thereby reducing disaster risks. Negative correlations are observed between particle size and arch particle count and between hydraulic pressure and arch formation time, while positive correlations exist with arch stability. Conversely, during the arch instability/flow inrush phase, sand inrush mass flow rate shows linear positive correlations with particle size and hydraulic pressure. Increased particle size and hydraulic pressure inversely amplify disaster risks. These findings reveal the alternating catastrophe mechanism of water-sand transport-stagnation cycles in mining fractures, providing theoretical insights for disaster prevention and control.

Key words: water and sand inrush; crack deterioration; transient model; fluid-solid coupling; catastrophic mechanism

0 引 言

煤炭资源是我国当前不可替代的关键能源^[1]。我国的能源赋存条件决定煤炭将长期处于主体能源地位,是国家能源安全稳定的“压舱石”^[2]。西部煤矿资源禀赋,是国家能源战略部署的重中之重,但西部特有的地层构造及脆弱的生态环境,加之大规模、高强度煤炭资源开采导致煤矿突水溃砂灾害时有发生,破坏生态的同时也严重制约国家能源稳定发展。

突水溃砂是近松散层采掘时含砂量较高的水砂混合流体溃入井下工作面并造成财产损失及人员伤亡的一种矿井地质灾害^[3],灾害发生的同时常伴随有矿压显现剧烈以及压架等事故^[4]。为了减少矿井采掘遭受突水溃砂威胁,许多学者在采动裂缝发育与水砂运移机制方面开展大量研究,并取得丰硕成果。探究水砂两相流动特征对深化突水溃砂致灾机理具有重要意义。学者们基于透明土试验获取孔口处水砂流动存在柱状流动和漏斗状流动2种方式^[5];在裂缝开口处存在高水压时,砂粒易堆积形成临时性结构阻滞砂粒流出^[6];砂粒起动速度和溃砂临界流速是突水溃砂致灾的判别标准^[7],砂粒起动速度与砂粒粒径有关^[8];砂粒成分中黏粒质量分数较低的松散砂体更易发生诱发突水溃砂,孔口裂缝宽度和初始水头共同决定溃砂量^[9]。砂粒运移过程分为局部空间拓展、局部空间移动和直接溃砂3种,按照裂缝内部应力分为碰撞运移型和连续运移型^[10];将突水溃砂致灾全过程可归纳为溃砂启动阶段、持续溃出阶段、淤积填塞阶段和溃出平衡阶段^[11]。采动裂缝是沟通物源和工作面的“桥梁”,也是突水溃砂致灾的重要因素。许多学者基于光滑直通裂缝、交叉组合裂缝、粗糙度裂缝^[12]、“异形”裂缝^[13]、垮落带破碎岩体^[14]等条件下获取水砂两相流运动特征;通过调节不同裂缝开度、裂缝倾角,并根据上覆岩层接触力、水流速

度及水砂拖曳力将水砂运移划分快速突出型和波动突出型^[15],裂宽增加会降低渗透破坏的临界水压和临界水力坡度^[16]。此外,不同地质环境下采动诱发裂缝发育规律存在差异。红土层对裂缝发育有抑制作用,但采动影响和水的渗透侵蚀对其有削弱影响^[17],松散层底黏和风化带泥类岩形成的楔形结构能阻止水砂下泄^[18],基岩与松散层底部黏土层的厚度增加,裂缝形态由“垂向直通”型转变为“倒楔形多层交错叠加组合”型^[19]。

由于地下采掘工程的隐蔽性与突水溃砂灾害突发性,通过现有监测技术与手段难以获取真实采动裂缝时空演化特征及水砂运移突涌特征,现有研究成果多基于数值模拟或室内试验方法,通过简化裂缝条件分析采动裂缝开口处水砂起动特征及裂缝内部的水砂运移特征,而对水砂在采动裂缝时空演化中起动-运移机制方面鲜有研究。因此,笔者基于PFC2D数值计算软件,模拟分析松散层下薄基岩采动裂缝时空演化特征,并通过构建四类采动裂缝劣化瞬态模型,分析采动裂缝不同瞬时形态(裂缝开度、裂缝形态)、砂粒粒径及水压条件下溃砂量、溃砂质量流量、砂粒结拱时间、矢跨比、拱脚线角和砂粒接触应力分布,获取采动裂缝内部水砂运移流溃与砂粒结拱淤滞特征,为进一步揭示采动覆岩破断水砂两相运移-淤滞交替时空灾变机理提供参考。

1 工程背景与数值计算模型

西部浅埋薄基岩矿区集中分布在陕北榆神矿区及乌兰木伦河中游东岸的神东矿区,地貌处在陕北黄土高原与毛乌素沙漠边缘的交界区^[19],地形起伏大。地层结构简单,地表至主采煤层自上而下由松散层、基岩层和煤层组成。

松散层主要由风积沙和萨拉乌苏组砂层构成,平均厚度15~50 m。构成风积沙地层的主要成分粉细砂,萨拉乌苏组砂层主要成分为中砂,局部地区为

砂砾石层。含水层水位埋深浅,一般在 0~5 m,区域富水性为中、强富水。松散层底界与基岩层直接接触,中间无隔水层。基岩层主要由中、下侏罗系地层构成。中侏罗统直罗组地层主要以灰绿色泥岩和砂岩为主,顶板基岩薄,基岩风化厚度平均为 10~20 m,强风化带厚度 5~8 m。下侏罗统延安组为区域的含煤地层。煤层埋深浅,多集中在 100~120 m;所采煤层厚度约 8 m,工作面长 200 m;煤层倾角为 1°~3°,属于稳定型煤层。

基于西部浅埋薄基岩工作面的钻孔资料,采用 PFC2D 软件构建薄基岩地层结构模型(图 1),模型尺寸为 200 m×73 m(长×高),左右两侧和底部为固定边界,地表为自由界面。该模型的岩层结构依照实际覆岩层序和岩性设置,为保证计算的效率和精度,颗粒半径按照一定的比例进行放大,砂粒半径范围为 0.1 m,岩体半径范围为 0.4~0.6 m,为减小边界影响并呈现工作面真实采动过程,设计从 35 m 边界煤柱处始采,开挖步距为 1 m。

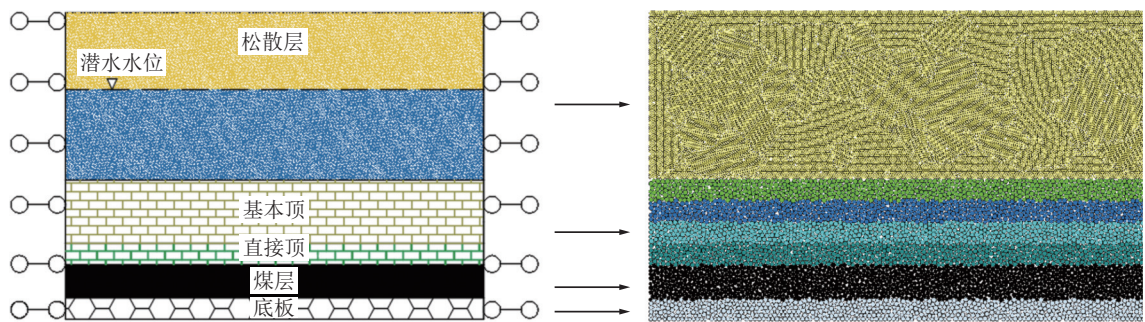


图 1 薄基岩地层结构模型
Fig.1 Structural modeling of thin bedrock strata

为获取 PFC 模型中所需的细观力学强度参数,通常采用试错法逼近岩土体物理力学特性^[20]或基于已有研究所得宏细观强度参数经验公式^[21]所得。薄

基岩地层结构模型所需细观物理力学参数是在文献 [22] 中经验式计算的基础之上进行调试,参数见表 1。

表 1 模型地层细观参数
Table 1 Table of modeled stratigraphic fine-scale parameters

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量 E/GPa	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	弹性模量 E/GPa	黏结强度 c/MPa	拉强度 σ/MPa	摩擦因数 μ	刚度比 k^*	分层厚度/m
砂层	1 600	—	—	—	—	—	—	0.58	1.0	40
细粒砂岩	2 500	7.03	9.43	1.99	10.30	5.80	8.40	0.50	1.5	5
中粒砂岩	2 500	7.03	10.12	2.15	10.30	6.60	8.40	0.50	1.5	5
砂质泥岩	2 500	2.94	8.26	1.74	4.30	5.06	7.40	0.50	1.5	5
泥岩	2 500	2.94	8.43	1.77	4.30	5.06	7.80	0.50	1.5	5
煤层	1 400	0.74	2.12	0.48	1.00	1.30	1.90	0.40	2.0	8
粉砂岩	2 400	2.32	7.23	1.58	3.40	7.20	5.45	0.50	1.5	5

2 采动覆岩裂缝劣化特征与瞬态模型构建

采动造成的覆岩破坏是引发突水溃砂的直接诱因^[23],然而,突水溃砂灾害演化是一个涉及采矿学、地质学、断裂力学、流体力学及散体力学等多学科交叉融合的复杂系统工程,其机理研究具有显著的综合性与复杂性。限于现有理论、室内试验条件或现场监测技术,难以满足深化研究需求,而通过数值模拟构建宏观开采模型,分析采动裂缝劣化与水砂运移时变特征也存在一定的局限性^[21-22],比如难以实

现精细化数据信息实时有效获取、运算负荷高、效率低等。为此,笔者先基于前述建立的松散层下薄基岩地层结构数值模型,结合作业面开采时覆岩破断与裂缝内砂体运移时变状态,筛析不同采动裂缝劣化瞬时形态,并构建其瞬态模型,然后基于采动覆岩裂缝劣化瞬态模型,开展不同瞬时形态采动裂缝内水砂运移特征模拟分析,近似还原采动覆岩破断水砂两相运移动态过程,为突水溃砂致灾机理研究提供参考。

2.1 采动覆岩破断与裂缝劣化时变特征模拟分析

采场覆岩破断及其运移规律,决定了采动裂缝动态演化特征^[24-25]。为此,基于采动覆岩破断及其水砂运移动态演化过程的数值模拟结果,分析采动覆岩破断与裂缝劣化时变特征。

由数值模拟结果可知,当工作面推采至 40 m 时,

直接顶发生初次垮落,之后随采随垮(垮落步距 4~6 m),基本顶随悬顶跨距增加,发生弯曲;推采至 64 m 时,在重力、上覆松散体载荷与采动应力协同作用下,基本顶整体发生拉剪破断,在煤壁上方逐渐形成贯通型裂缝,并随破断岩体回转切落,砂粒沿采动裂缝溃入井下(图 2)。

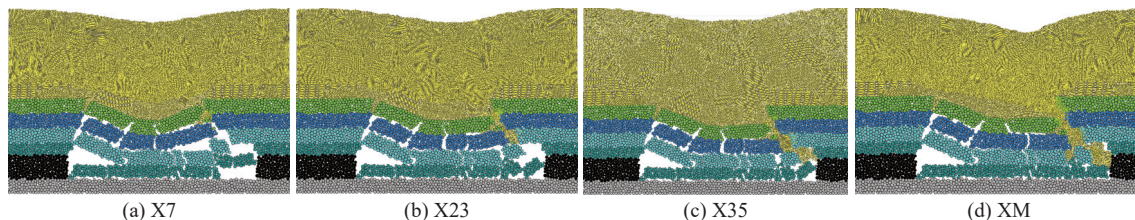


图 2 采动覆岩破断与水砂运移动态演化过程

Fig.2 Dynamic evolution of mining overburden breakup and water-sand transport process

为进一步分析采动覆岩贯通型裂缝劣化与砂体运移过程,将其进行切片与筛析,最终选定采动覆岩贯通裂缝劣化过程中 4 种瞬时状态(图 3),即 X7、X23、X35、XM(对应循环步数分别为 14 000、46 000、70 000 步,平衡状态步数),并对模拟结果进行去除砂粒处理,进而获取采动裂缝不同瞬时形态:

①由图 3a 可知,采场上方直接顶 G、基本顶底部 F 发生垮落,引发上部岩块 D、岩块 E 发生回转,这一过程导致采场上方覆岩形变加剧,采动裂缝开度增加;其中,裂缝“喉部”(即裂缝开度最小值)为 0.44 m,砂粒呈拱淤滞于此。②由图 3b 可知,岩块 G 失稳断裂成岩块 H 和岩块 I,同时上方基本顶岩块 D、E、F 在自重与上覆松散体载荷作用下迅速发生回转;此时,采动裂缝上部开度明显增加,“喉部”位置下移,开度大小为 0.44 m,砂粒下移并重新在“喉部”形成粒拱结构(图 3b)。③由图 3c 可知,基本顶岩块 D、E、F 继续发生滑落回转,裂缝开度也随之增加,粒拱结构失稳,砂体持续溃入采场;并且在岩块滑落撞击与砂体冲击作用下,岩块 I 与煤壁形成的铰接结构逐步失稳,引起岩块 F 再次回转,裂缝开度进一步增加,通道内残余砂体也进入采场(图 3d)。

2.2 采动裂缝劣化瞬态模型构建方法

提出一种采动覆岩裂缝劣化瞬态模型构建方法,具体步骤如下(图 4):①将开采后的薄基岩地层结构模型图片导入 ImageJ 软件中,图片模式调整为 8-bit(即转换为灰度图像),通过“Threshold”功能简化图像信息,完成图像的二值化处理。②将经过二值化处理的图像进一步导入 Adobe illustrator 软件。利用编辑选项卡“转换灰度”功能对图像进行预处理,执行默认的图像描摹,将视图设置为“描摹结果(带

轮廓)”模式,以此获取采动覆岩裂缝劣化瞬态特征文件。最后,将此文件导出 DWG 格式文件。③打开 AutoCAD 软件,将导入的图像轮廓线进行分解处理,对裂缝外部轮廓线进行精细化处理,得到采动裂缝劣化轮廓线图。完成处理后,将文件转化为 DXF 格式文件。④将 DXF 格式文件载入离散元 PFC2D,通过 Geometry 命令建模,并编写 Fish 语句获取采动裂缝的具体位置信息及相关尺寸数据。⑤选择采动裂缝优势通道,重点处理分支裂缝通道,防止分支裂缝通道对溃砂进程进行干扰,并将 Geometry 模型通过 Wall 命令转化为墙模型,完成采动覆岩裂缝劣化瞬态模型的构建。⑥基于 CFD-DEM 方法实现水砂双向耦合过程,即通过 Python 语言绘制 2D 流体网格,施加流体域,计算流场信息,再根据 DEM 循环计算砂粒碰撞信息并更新时间步,依次循环时间步,从而实现突水溃砂致灾过程分析。

3 采动裂缝劣化砂粒运移特征

基于前述数值模拟可知,工作面采动岩层断裂垮落与岩块回转失稳会导致采动裂缝开度发生变化,同时在裂缝内砂粒运移会呈现颗粒结拱与粒拱失稳流溃交替现象(图 3)。为探究采动裂缝劣化砂粒运移机制,基于构建采动覆岩裂缝劣化瞬态模型(X7、X23、X35、XM),设置砂粒粒径 0.1~0.2 m,水压 0.001 MPa,分析采动裂缝劣化砂粒运移特征。

3.1 采动裂缝劣化砂粒结拱分析

由图 5 可知,砂粒粒径 $d=0.2$ m 时,裂缝形态 X7、X23 溃砂质量较少,此时裂缝开度较小,在采动裂缝中砂粒结拱淤滞;采动裂缝进一步劣化,裂缝形态呈 X35、XM 时,溃砂质量显著增加,说明随采动裂缝开

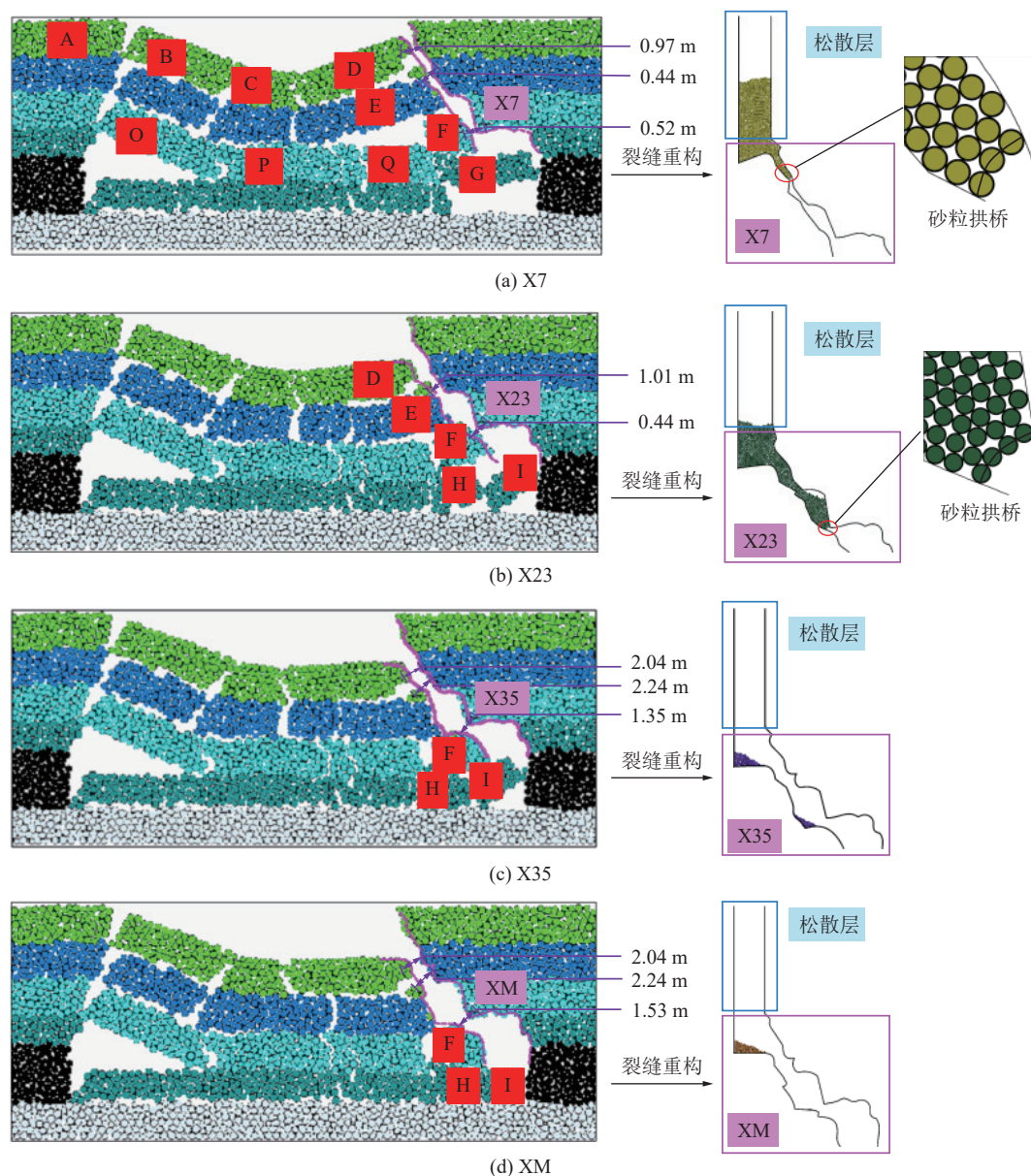


图 3 采动覆岩裂缝劣化瞬态模型

Fig.3 Transient modeling of fracture degradation in overburden mining

度增加,粒拱结构一旦失稳,砂体便会溃入采场。砂粒粒径 $d=0.1\text{ m}$ 时,砂体均会沿 X7、X23、X35、XM 4 种瞬时形态裂缝溃入采场;当砂粒粒径增至 0.2 m ,裂缝形态为 X7、X23 时,砂粒在裂缝“喉部”处出现结拱淤滞。

由此表明,裂缝开度与粒径的相对关系(即裂粒比)是决定砂粒结拱亦或粒拱失稳流溃的重要条件,而两种状态转换会存在一个临界值。即当裂粒比不超过临界值时,砂粒结拱淤滞,溃砂停止;一旦裂粒比超过临界值时,粒拱结构发生失稳,砂体沿裂缝流溃至工作面。

3.2 采动裂缝劣化砂粒流溃特征分析

为获取采动裂缝劣化过程中砂粒流溃特征,基

于构建的 4 种采动裂缝瞬态模型,对不同粒径下裂缝内溃砂质量变化情况进行分析(图 6、图 7)。结果表明,当砂粒沿裂缝出现持续流溃时,即使在不同形态的采动裂缝条件下,溃砂质量变化趋势一致,并且可将砂体流溃过程划分为 2 个阶段:第 1 阶段为涌溃阶段,此阶段砂粒沿裂缝通道内部持续稳定流动,溃砂质量与时间近似呈线性正相关;第 2 阶段为休止阶段,此阶段由于砂源持续减少,难以维系砂粒稳定流动,残余砂粒达到自然休止角便不再流动,溃砂逐渐停止,即溃砂质量随时间增加而趋于平缓。

溃砂质量流量能够直观反映涌溃阶段砂粒缝内的运动状态。由图 8 可知,在涌溃阶段,大粒径砂粒的溃砂质量流量高于小粒径砂粒,溃砂质量流量随

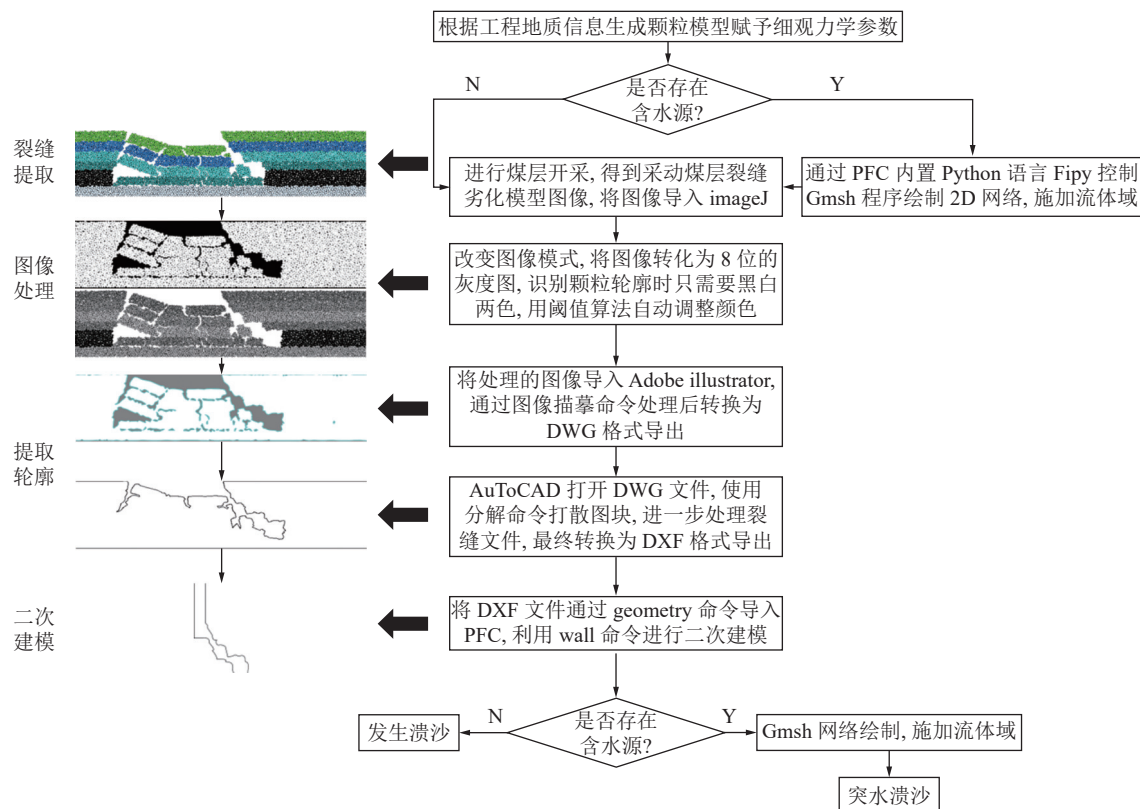


图 4 采动裂缝劣化瞬态模型构建流程

Fig.4 Flow chart of transient model construction for mining fracture deterioration

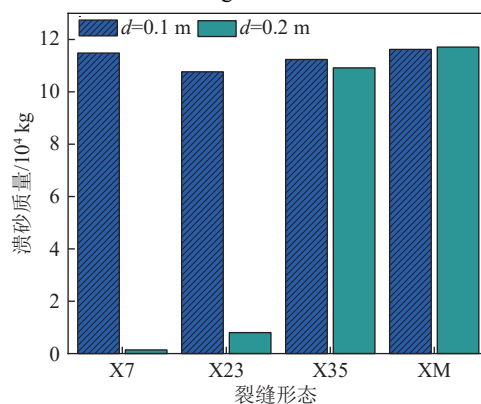
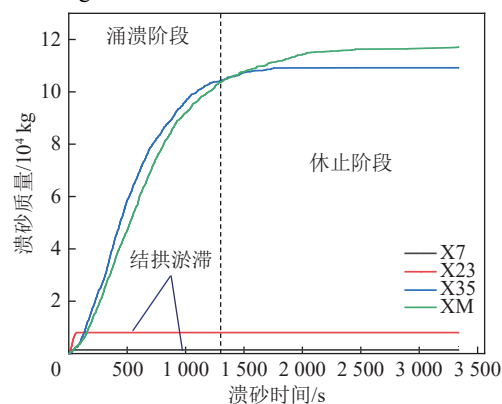
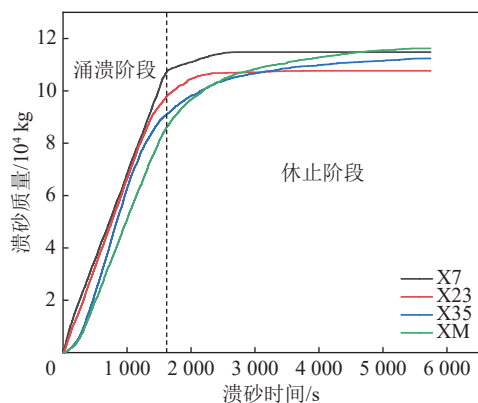


图 5 不同裂缝形态溃砂质量

Fig.5 Amount of sand inrush from different crack shapes

图 7 $d=0.2$ m 时溃砂质量Fig.7 $d=0.2$ m amount of sand inrush图 6 $d=0.1$ m 时溃砂质量Fig.6 $d=0.1$ m amount of sand inrush

采动裂缝劣化程度增加而降低,其原因与砂粒接触摩擦力大小及裂缝形态有关。如图 9 所示,采动裂缝内壁坡度随裂缝开度增加逐渐变缓,砂粒不仅易在缝内低平处淤积,而且会增加砂粒与裂缝内壁及砂粒间的接触摩擦力,进而导致溃砂质量流量降低。

相关研究表明^[26],同种裂缝形态下,粒径会改变缝内颗粒间的接触摩擦力,进而引起砂粒流型的转变;比如管道内砂粒的流型可划分颗粒分散流、壁面砂粒稀疏流、壁面砂粒密集流等流型。由此分析,同种裂缝形态下,单个大粒径砂粒质量大于小粒径砂粒,流动中其密集程度更高、粒间碰撞频次更低,能

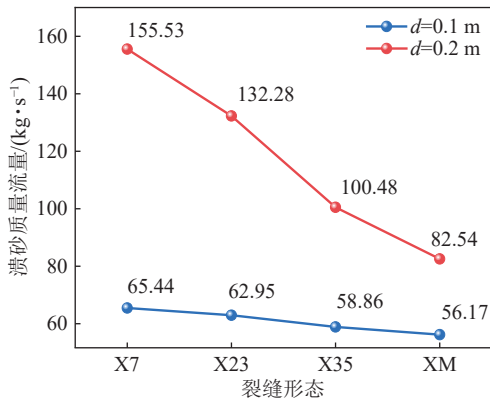


图 8 采动裂缝劣化溃砂质量流量

Fig.8 Mass flow rate of sand intrus due to mining deteriorating fractures

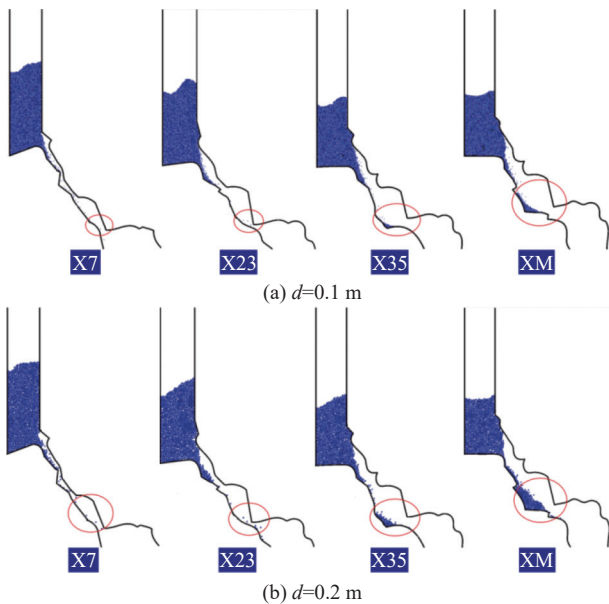


图 9 采动裂缝劣化内部不同粒径砂粒运移

Fig.9 Mining fracture degradation internal transport of sand particles of different grain sizes

量耗散少,故溃砂质量流量更高。

4 砂体结拱与粒拱失稳流溃时空灾变机理

通过模拟分析不同粒径与水压条件下采动裂缝内砂粒结拱与粒拱失稳流溃时变特征,进一步探究采动裂缝内砂粒结拱与粒拱失稳流溃时空灾变机理。

4.1 不同粒径砂粒结拱淤滞与流溃机制

通过不断调整粒径模拟采动裂缝内砂粒结拱亦或流溃情况,最终确定粒径为 0.116 m,裂缝开度为 0.44 m 时,得出在采动裂缝内部砂粒成拱淤滞的临界裂粒比为 3.793。为探究不同粒径下采动裂缝内粒拱形成特征,在保证其他条件相同前提下,开展基于采动覆岩裂缝劣化瞬态模型多粒径条件缝内成拱

特征数值模拟分析。

通过对数值模拟中粒拱形成过程的统计分析,得出粒拱形成需要满足 2 个条件:① 构成粒拱的砂粒数目不超过临界砂粒数目。② 裂缝“喉部”中心砂粒速度与边壁砂粒速度相近(处在同一量级)。

由图 10、图 11 可知,砂粒结拱时,随粒径增大,采动裂缝上部残余砂量逐渐增多,形成粒拱的时间逐步加快,说明粒径愈大缝内结拱几率愈高。随粒径增加,砂粒流型逐渐由壁面砂粒密集流向颗粒分散流转变。砂体粒径较小时,溃砂质量流量随粒径增加而快速增大,砂粒结拱时间骤降。当粒径较大时,随粒径增加,溃砂质量流量的增长速度逐渐减缓,极短时间内砂粒成拱淤滞,限制砂粒运移。最终导致溃砂质量流量趋于定值,粒拱形成时间趋近于 0。

通过分析粒径与淤滞前溃砂质量流量及粒拱形成时间的关系,分别得到粒径与溃砂质量流量和粒拱形成时间的拟合式:

$$q_{m1} = 165.723\,27 - \frac{33\,382.031\,22}{1 + \left(\frac{d}{0.041\,34}\right)^{5.989\,04}} \quad (1)$$

$$t = -130\,254.916\,11e^{\frac{-d}{0.026\,31}} + 142\,615.030\,37e^{\frac{-d}{0.028\,55}} \quad (2)$$

式中: q_{m1} 为重力驱动溃砂质量流量, kg/s。 t 为砂粒结拱时间, s; d 为砂体粒径, m。

由图 10、图 12 可知,粒径尺寸也会影响砂粒成拱形态与粒拱结构稳定性,包括成拱砂粒数目、矢跨比^[27](拱顶至拱脚垂距与两拱脚水平间距之比,可表征粒拱的坦陡程度,能够直观反映粒拱水平力与垂直力的比例关系)、拱脚线角 θ (拱脚连线与水平线夹角)以及拱粒间接触力。随粒径不断增大,成拱砂粒数目减少,即由五粒拱转为四粒拱、三粒拱;并且粒拱矢跨比加权值(四粒拱跨比加权值 0.205 大于三粒拱跨比加权值 0.091)随成拱砂粒数目减少而降低,拱粒间接触力加权值(四粒拱接触力加权值 35 816 N 于三粒拱接触力加权值 38 546 N)随成拱砂粒数目减少而增大;在成拱砂粒数目相同时,拱脚线角 θ 与拱粒间接触力均随粒径增加而显著增大,矢跨比增幅平缓;综上分析表明,随粒径增大,成拱颗粒数目减少,而粒拱结构稳定性不断增强。

为分析不同粒径砂粒缝内流溃特征,选用 X7 裂缝瞬态模型,水压设置 0.001 MPa,分别设置粒径为 0.078、0.080、0.100、0.114 m,进行模拟分析。分析结果表明,当砂粒沿裂缝出现持续流溃时,在不同粒径条件下的溃砂质量变化趋势一致(图 13),而溃砂

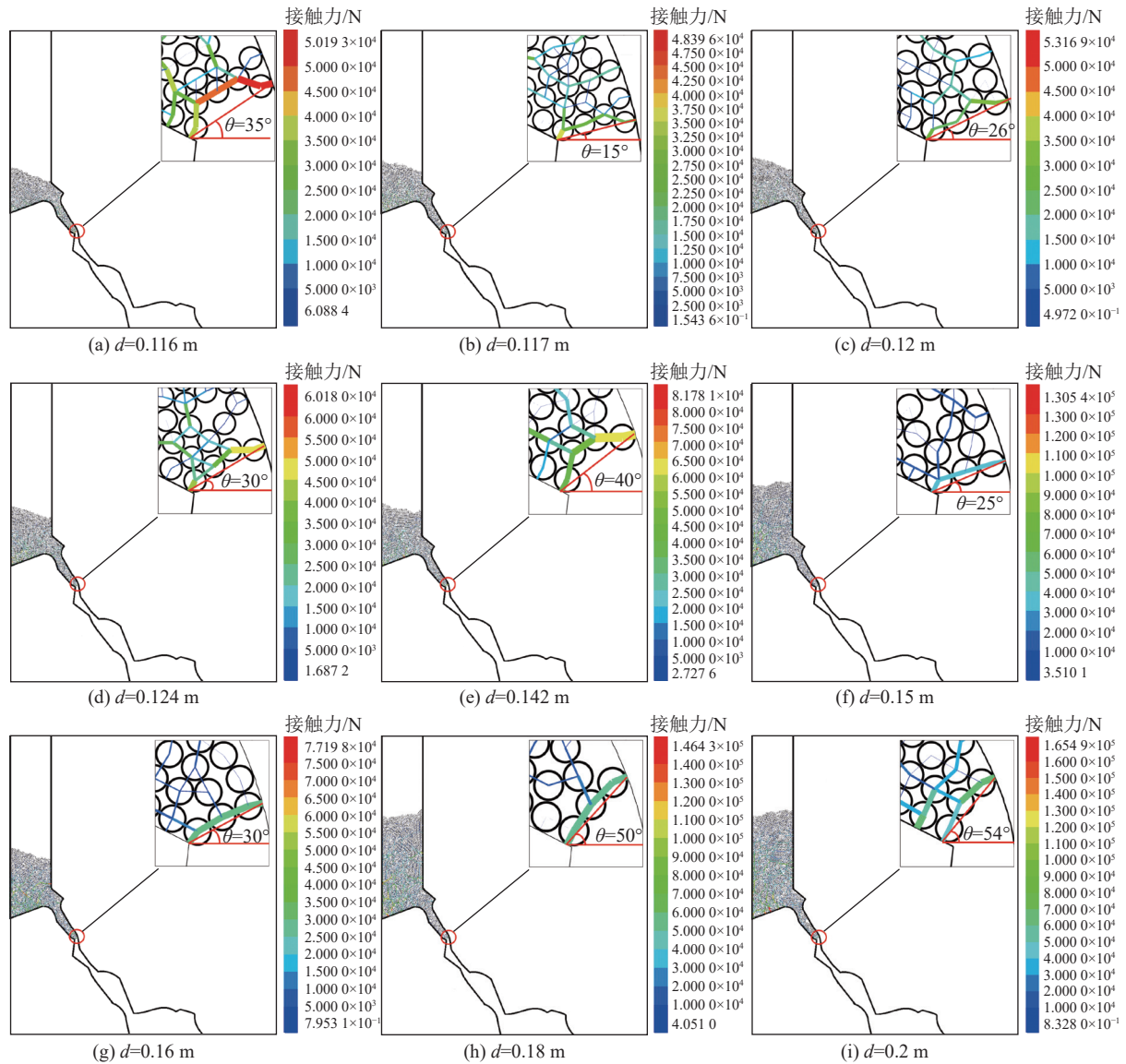


图 10 不同粒径粒拱

Fig.10 Arch of different particle sizes

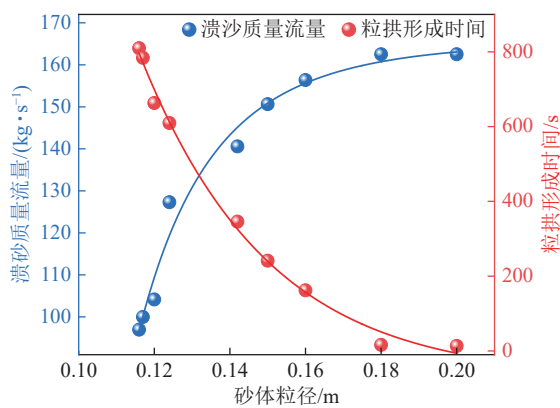


图 11 不同粒径溃砂质量流量与粒拱形成时间

Fig.11 Mass flow rate of sand inrush with different particle sizes and the time for grain arch formation

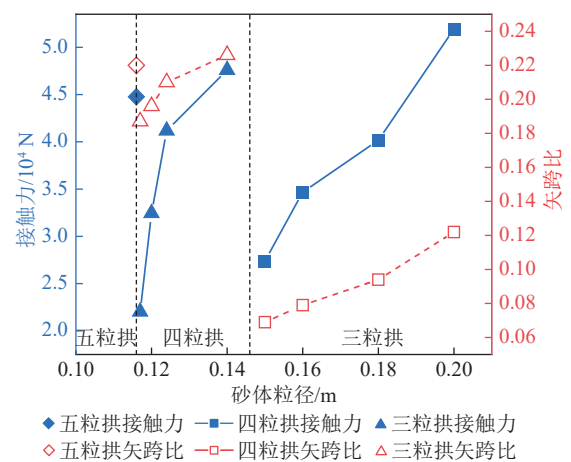


图 12 不同粒径粒拱矢跨比与接触力

Fig.12 Rise-span ratio and contact force of arch with different particle sizes

质量流量与粒径呈线性正相关(图 14), 其拟合式:

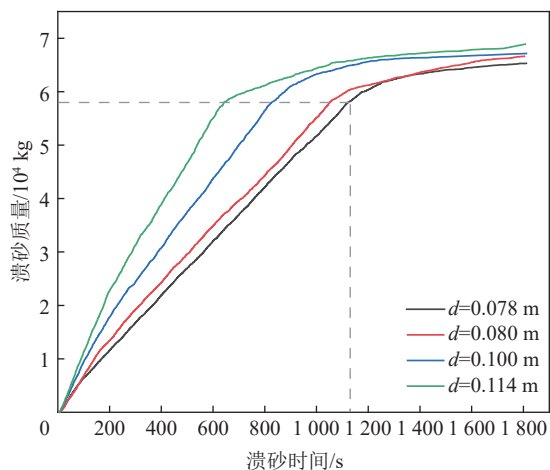


图 13 流溃过程中不同粒径溃砂质量

Fig.13 Amount of sand inrush of different particle sizes during the flow process

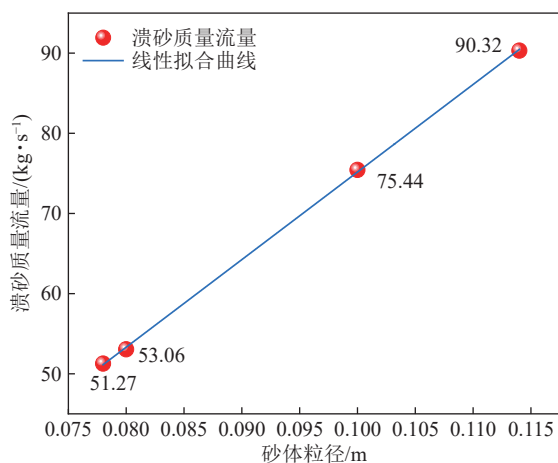


图 14 流溃过程中不同粒径溃砂质量流量

Fig.14 Mass flow rate of sand inrush of different particle sizes during the flow process

$$q_{m2} = -31.100\,02 + 1\,092.683\,95\,d \quad (3)$$

式中: q_{m2} 为不同粒径重力驱动溃砂质量流量, kg/s 。

从能量守恒定律角度分析, 当砂粒沿裂缝出现持续流溃时, 溃砂质量流量会随粒径增加而增大, 进而加剧溃砂致灾危害程度: 粒径增加, 会降低砂粒碰撞裂缝内壁以及砂粒之间碰撞次数与接触摩擦力, 进而减少砂粒缝内流溃过程中的能量耗散, 使得砂粒获取更高动能溃入采场。

4.2 不同水压砂粒结拱淤滞与粒拱失稳流溃机制

为分析水压对粒拱形成的影响作用, 选取砂粒临界成拱条件(粒径为 0.116 m, 裂缝开度为 0.44 m), 通过设置恒定水压(0 ~ 1 MPa)进行模拟分析。图 15 表明, 当砂粒成拱(裂粒比不超过临界值)时, 随水压增加, 拱粒数目会有所减少, 水压 0 ~ 0.01 MPa 时溃砂质量流量较大, 结拱所需时间长; 0.01 ~ 1 MPa 时

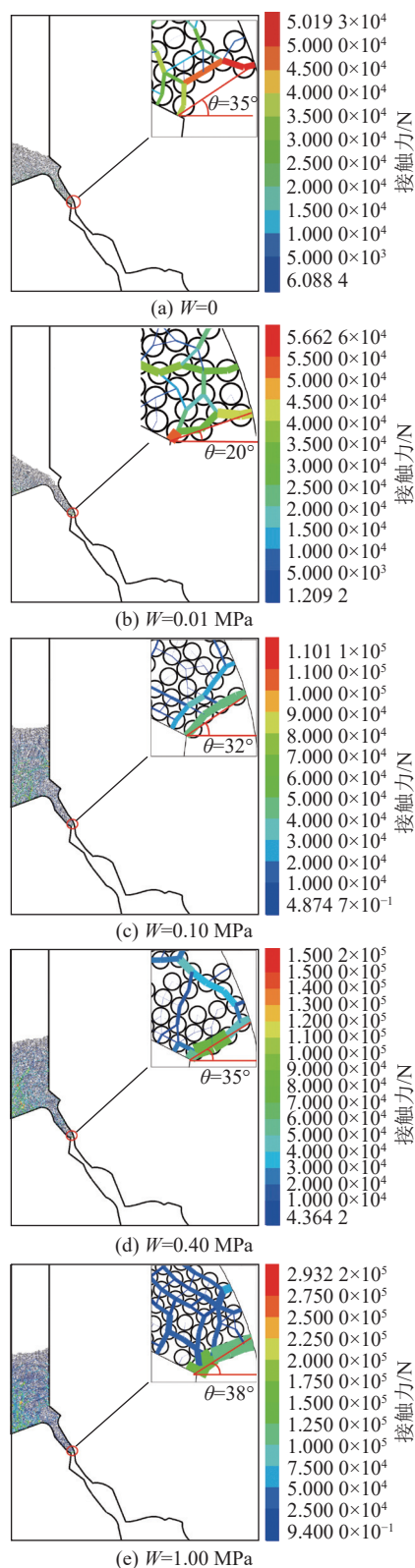


图 15 不同水压粒拱

Fig.15 Grain arch with different water pressure

溃砂质量流量减少, 结拱所需时间缩短, 结拱几率明显增加。当拱粒数目相同时, 拱脚线角会随水压增加而增大, 粒拱结构稳定性不断增强。

由图 16 可知, 水压对于粒拱形成机制呈现双重

作用。在 A 区(水压<0.01 MPa)时,水压抑制粒拱形成,溃砂质量流量和粒拱形成时间逐步增加。在微小水压作用下,砂粒流型以颗粒分散流为主导,溃砂质量流量小幅增加,表明在裂缝通道“喉部”处砂粒流动速率不断增大,导致粒拱形成的速度条件不易满足,粒拱形成时间延长;在 B 区(水压为 0.01 ~ 0.1 MPa),水压促进粒拱形成。随着水压增大,砂粒流型以壁面砂粒密集流为主导,溃砂质量流量和粒拱形成时间陡然下降,砂粒间的接触摩擦力增大,砂粒运移速度变慢,容易满足粒拱形成的速度条件;在 C 区(水压>0.1 MPa),水压进一步促进粒拱形成。当水压进一步增大时,大量砂粒在通道内部快速流动,溃砂质量流量激增,“喉部”上部堆积大量砂粒,使得粒拱形成的速度条件更容易达到,粒拱形成时间进一步缩短。

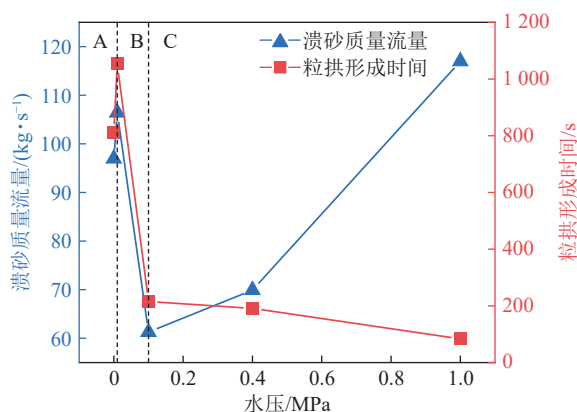


图 16 不同水压溃砂质量流量与粒拱形成时间

Fig.16 Mass flow rate of sand inrush with different water pressures and the time for grain arch formation

由图 17 可知,在水压为 0.01 MPa 时,拱粒接触力链传递的力与矢跨比均达到最小值,此时拱粒数目减少为 4,达到最低值。水压为 0 ~ 0.01 MPa 时,

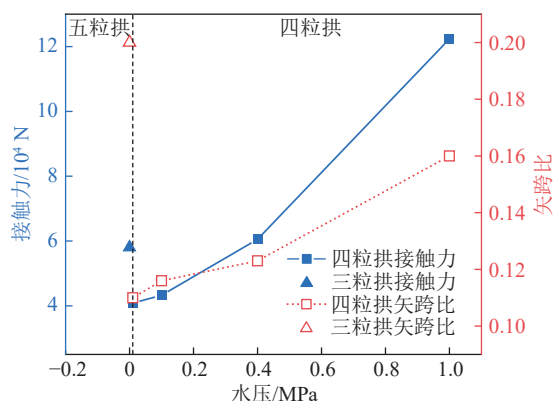


图 17 不同水压粒拱矢跨比与接触力

Fig.17 Rise-span ratio and contact force of arch with different hydraulic pressure grains

随水压增加,矢跨比陡然下降,表明微小水压不会促使粒拱形成,且粒拱稳定性较差;水压为 0.01 ~ 1 MPa 时,随着水压增加,矢跨比与粒间接触应力均逐步增加,表明砂粒结拱几率增加,其结构稳定性也不断增强。

此外,高水压对粒拱形成具有促进作用。在高水压环境下,即使裂粒比小幅超过临界裂粒比,依然可以形成粒拱。由图 18、图 19 可知,当裂粒比超过临界裂粒比(3.793)时,且水压为 0 时,此时砂粒运移速度较慢,未形成粒拱,导致溃砂质量激增;当水压为 1 MPa 时,在其他条件不变的情况下,水压的增加使得砂粒运移速度变快,造成砂粒堆积在裂缝“喉部”上方,促使粒拱形成。但随着裂粒比增加,粒拱形成所需时间变长,粒间接触力变小,粒拱结构不稳定,溃砂质量缓慢增加,此时水压对粒拱形成的促进作用也会逐渐减弱。当裂粒比达到 3.81 时,水压则无法促使砂粒形成粒拱,进而溃砂质量激增。

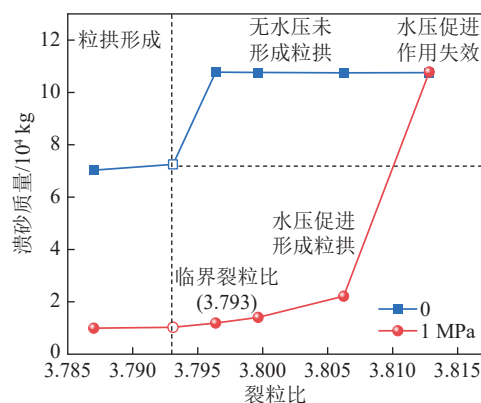


图 18 不同水压裂粒比与溃砂质量

Fig.18 Aperture particle ratio of different water pressures and the amount of sand inrush

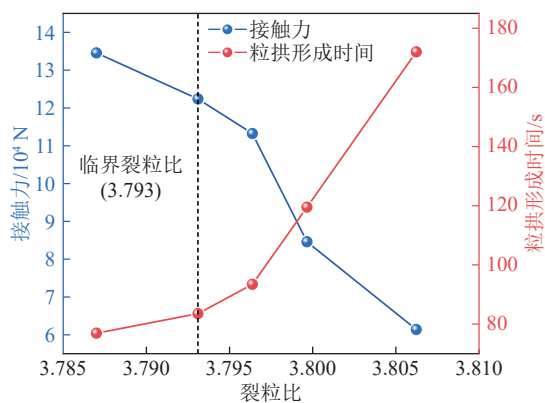


图 19 水压 1 MPa 粒拱形成时间与粒间接触力

Fig.19 Water pressure 1 MPa Grain arch formation time and inter-grain contact force

为分析不同水压下砂体流溃特征,选取裂缝形

态 X24, 设定砂粒粒径为 0.1 m, 将水压设置为 0 ~ 1 MPa, 同时采动裂缝边界设置为不透水边界, 暂不考虑水压对采动裂缝开度及形态的影响。由图 20、图 21 可知, 在相同砂源且出现持续流溃条件下, 水压愈大, 水砂涌溃阶段的时间愈短, 并且溃砂质量流量呈线性增加, 水压是影响突水溃砂危险程度的关键因素之一。

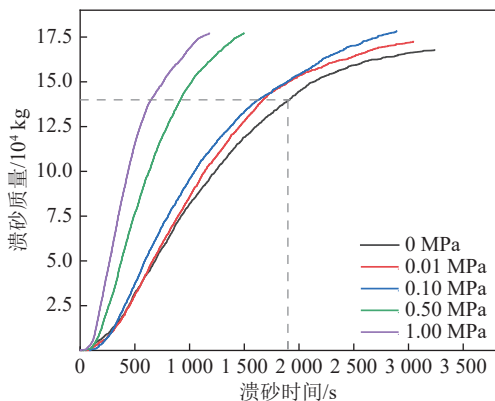


图 20 流溃过程中不同水压溃砂质量

Fig.20 Amount of sand inrush under different water pressures during the flow process

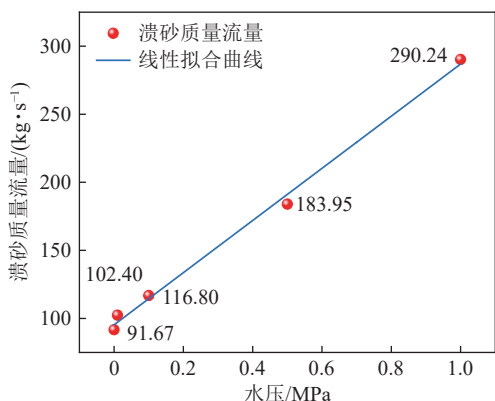


图 21 流溃过程中不同水压溃砂质量流量

Fig.21 Mass flow rate of sand inrush under different water pressures during the flow process

综上所述, 水压对砂粒结拱与流溃起到“双向促进”作用。在裂缝开度小且满足砂粒结拱条件下, 水压促进粒拱形成, 且水压愈大缝内粒拱形成愈快, 拱体结构愈稳定; 同时, 高水压促进缝内结拱淤滞, 在一定程度上能降低致灾几率。但随采动裂缝劣化开度增加, 一旦触发缝内粒拱失稳流溃, 高水压便会反向加剧突水溃砂致灾危害程度。

5 结论与展望

1) 基于浅埋薄基岩地层采动数值模拟, 获取采动覆岩破断与裂缝劣化时变特征, 提出了采动裂缝

劣化瞬态模型构建方法, 为深入研究采动裂缝时空演化与水砂两相起动运移机制提供了新思路。

2) 在采动覆岩裂缝演化过程中水砂运移呈现砂粒结拱淤滞与粒拱失稳流溃交替特征, 裂缝开度与砂粒粒径的相对关系(即裂粒比)是决定砂粒结拱抑或粒拱失稳流溃的关键, 而 2 种状态转换会存在一个临界值。即当裂粒比不超过临界值时, 砂粒在缝内会出现结拱淤滞, 溃砂停止; 一旦裂粒比超过临界值时, 会触发缝内粒拱结构失稳, 砂体便沿裂缝流溃而下。

3) 砂粒粒径与水压对砂粒结拱与粒拱失稳流溃机制均起到“双向促进”作用。当裂缝内砂粒结拱淤滞时, 砂粒粒径、水压的增加会提高砂粒结拱几率与粒拱稳定性, 进而降低致灾风险。砂粒粒径、水压分别与拱粒数目、结拱时间均呈负相关性, 与粒拱稳定性呈正相关性; 当裂缝劣化引发粒拱结构失稳流溃时, 砂粒粒径、水压的增大反而会加剧致灾危害程度, 砂粒粒径、水压与溃砂质量流量均呈线性正相关。

4) 受模拟软件计算性能限制, 本文设定的砂粒粒径与实际值存在一定偏差。但从利用宏观开采模型模拟研究采动覆岩劣化与通道形成动态过程来讲, 砂粒粒径在小范围变化量级情况下对覆岩采动裂缝形态特征的影响轻微; 并且提出裂粒比(裂缝开度与砂粒粒径的比值)是决定缝内砂粒结拱抑或失稳流溃的关键, 其实为无量纲参数, 粒径大小仅会对缝内砂粒发生结拱或涌溃的时刻(瞬态)与位置有一定影响, 但不会影响“缝内会出现砂粒成拱淤堵与渗透失稳涌溃交互特征”的结论。

5) 本文是基于 PFC2D 渗流模型, 研究采动裂缝通道内水砂两相运移特征, 不足之处在于, 未充分考虑裂缝开度较大时, 流态由层流转为紊流状态的情况, 以及高水压对采动裂缝开度的促进影响。为此, 后续有待开发紊流模型来进一步深入探究裂缝内水砂两相的运移机制。

参考文献(References):

- [1] 中国煤炭工业协会. 煤炭工业“十四五”结构调整指导意见[EB/OL]. [2025-03-24]. <https://www.coalchina.org.cn/uploadfile/2021/0603/20210603114643414.pdf>.
- [2] 中国煤炭工业协会. 《2022 煤炭行业发展年度报告》[EB/OL]. [2025-03-24]. <https://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=146684/>.
- [3] 隋旺华. 采掘溃砂机理与预防[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [4] 许延春, 赵霖, 任志祥, 等. 承压防砂煤(岩)柱下溃水溃砂工作面压架机理及支架阻力确定[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021,

- 3(2): 67–75.
- XU Yanchun, ZHAO Lin, REN Zhixiang, et al. Mechanism of support crushing and determination of support resistance for water and sand collapse working faces under pressure-resistant sand-prevention coal and rock pillars[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2): 67–75.
- [5] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控 I: 顶板溃水溃砂[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 903–921.
- SUI Wanhua. Catastrophic mechanism of seepage deformation and failure of mining rock mass and its prevention & control I: Water-sand mixture inrush from seam roof[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 903–921.
- [6] 浦海, 郭世儒, 刘德俊, 等. 基于 LBM-DEM 耦合方法的突水溃砂运移规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 206–216.
- PU Hai, GUO Shiru, LIU Dejun, et al. Study on laws of water inrush and sand burst migration based on LBM-DEM coupling method[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 206–216.
- [7] 杨鑫, 徐曾和, 杨天鸿, 等. 西部典型矿区风积沙含水层突水溃沙的起动条件与运移特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 21–28, 35.
- YANG Xin, XU Zenghe, YANG Tianhong, et al. Incipience condition and migration characteristics of aeolian-sand aquifer in a typical western mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 21–28, 35.
- [8] 杨斌, 杨天鸿, 徐曾和, 等. 中国西部矿区厚松散层的溃沙临界流速与水沙流动特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(11): 1648–1652, 1657.
- YANG Bin, YANG Tianhong, XU Zenghe, et al. Critical velocity of sand inrush and flow characteristics of water-sand in thick unconsolidated formations of mine in western China[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(11): 1648–1652, 1657.
- [9] 隋旺华, 蔡光桃, 董青红. 近松散层采煤覆岩采动裂缝水砂突涌临界水力坡度试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2084–2091.
- SUI Wanhua, CAI Guangtao, DONG Qinghong. Experimental research on critical percolation gradient of quicksand across overburden fissures due to coal mining near unconsolidated soil layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2084–2091.
- [10] 李智, 隋旺华, 张新佳. 裂隙内部溃砂运移特点及应力波动研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 981–991.
- LI Zhi, SUI Wanhua, ZHANG Xinjia. Experimental investigation on movement and stress fluctuation of quicksand inside fissure[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 981–991.
- [11] 张士川, 李杨杨, 李金平, 等. 采动裂隙突水溃砂过程物理参量变化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3548–3555.
- ZHANG Shichuan, LI Yangyang, LI Jinping, et al. Experimental studies on variation characteristics of physical parameters during water and sand burst through mining fractures[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3548–3555.
- [12] 刘亚群, 周宏伟, 李翼虎, 等. 浅埋煤层开采突水溃砂的颗粒流模拟研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(5): 534–540.
- LIU Yaqun, ZHOU Hongwei, LI Yihu, et al. Water-sand inrush simulation under shallow coal mining based on the particle flow code[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(5): 534–540.
- [13] 李瑞鹏. 采动覆岩“异型”裂隙通道水砂混合流运移规律及突涌特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- LI Ruipeng. Study on migration law and sudden inflow characteristics of water-sand mixed flow in “special-shaped” fracture channel of mining overlying rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [14] 梁坤坤, 隋旺华, 朱涛, 等. 哈拉沟煤矿垮落带破碎岩体溃砂的离散元数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 470–476.
- LIANG Yankun, SUI Wanhua, ZHU Tao, et al. Numerical simulation of quicksand through the broken rocks in caving zone due to coal mining based on DEM[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 470–476.
- [15] 钟江城, 周宏伟, 赵宇峰, 等. 浅埋煤层开采突水溃砂两相流的耦合数值研究[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 229–238.
- ZHONG Jiangcheng, ZHOU Hongwei, ZHAO Yufeng, et al. The two-phase flow of water-sand inrush under shallow coal seam mining: A coupled numerical study[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 229–238.
- [16] 康方, 胡东祥, 孟凡贞, 等. 厚松散层底部土层抗渗透破坏突水溃砂研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(3): 153–159, 165.
- KANG Fang, HU Dongxiang, MENG Fanzhen, et al. Study on water and sand burst for anti-seepage failure of thick loose layer bottom soil[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(3): 153–159, 165.
- [17] 吴绪南, 张文泉, 王永洁, 等. 含红土层薄基岩工作面突水溃砂机制与影响因素模拟研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(12): 161–169.
- WU Xunan, ZHANG Wenquan, WANG Yongjie, et al. Simulation study on the mechanism and influencing factors of water and sand inrush in the working face of thin bedrock with laterite layer[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(12): 161–169.
- [18] 许延春, 马子民, 李小二, 等. 基岩风化带性质对顶板突水溃砂的影响研究: 以赵固一矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 64–71.
- XU Yanchun, MA Zimin, LI Xiaor, et al. Research on the influence of the nature of the weathered bedrock zone on the roof water bursting and sand bursting: Taking Zhaogu No. 1 Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 64–71.
- [19] 张贵彬, 王荣强, 马俊鹏, 等. 浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 165–175.
- ZHANG Guibin, WANG Rongqiang, MA Junpeng, et al. Study on solid-fluid coupling similarity simulation test of water-sand inrush during mining of shallow buried thin bedrock roof[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 165–175.
- [20] 魏江波, 王双明, 宋世杰, 等. 浅埋煤层过沟开采覆岩裂隙与地表裂缝演化规律数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 67–75.
- WEI Jiangbo, WANG Shuangming, SONG Shijie, et al. Numerical simulation on evolution law of overburden fractures and sur-

- face cracks in crossing ditch mining of shallow coal seam[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 67–75.
- [21] 蒋明镜, 方威, 司马军. 模拟岩石的平行粘结模型微观参数标定[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 50–56.
JIANG Mingjing, FANG Wei, SIMA Jun. Calibration of micro-parameters of parallel bonded model for rocks[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2015, 45(4): 50–56.
- [22] 石钰, 邢珍珍, 詹可亮, 等. 基于 PFC 的上向远距离被保护煤层横向裂隙时空演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(1): 229–238.
SHI Yu, XING Zhenzhen, ZHAN Keliang, et al. Research on spatial-temporal evolution law of transverse fractures in upward long-distance protected layer based on PFC[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2025, 42(1): 229–238.
- [23] 隋旺华. 基于结构水文地质学的采掘诱发高势能突水溃砂主动防控[J]. 工程地质学报, 2022, 30(1): 101–109.
SUI Wanghua. Active prevention and control of water-sand mixture inrush with high potential energy due to mining based on structural hydrogeology[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(1): 101–109.
- [24] 李俊平, 管婷婷, 冯嘉禹, 等. 矿震与冲击地压防治研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 85–93.
LI Junping, GUAN Tingting, FENG Jiayu, et al. Research progress on prevention and control of mine earthquake and rock burst[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(1): 85–93.
- [25] 王家臣, 许家林, 杨胜利, 等. 煤矿采场岩层运动与控制研究进展: 纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论 40 年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 80–94.
WANG Jiachen, XU Jialin, YANG Shengli, et al. Development of strata movement and its control in underground mining: In memory of 40 years of Voussoir Beam Theory proposed by Academician Minggao Qian[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 80–94.
- [26] RAMIN D, RAM S. M, OVADIA S, et al. Solid-Particles Flow Regimes in Air/Water Stratified Flow in a Horizontal Pipeline[J]. *Oil and Gas Facilities*, 2016, 5(6): 174960.
- [27] 陶连金, 黄琳昆, 石城, 等. 超大跨度扁平地下洞室变形控制标准研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(1): 9–15.
TAO Lianjin, HUANG Linkun, SHI Cheng, et al. Deformation control standards for super-large-span flat underground cavern[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(1): 9–15.